

# 放射性炭素分析で見る 土壌有機物の動態と多様性

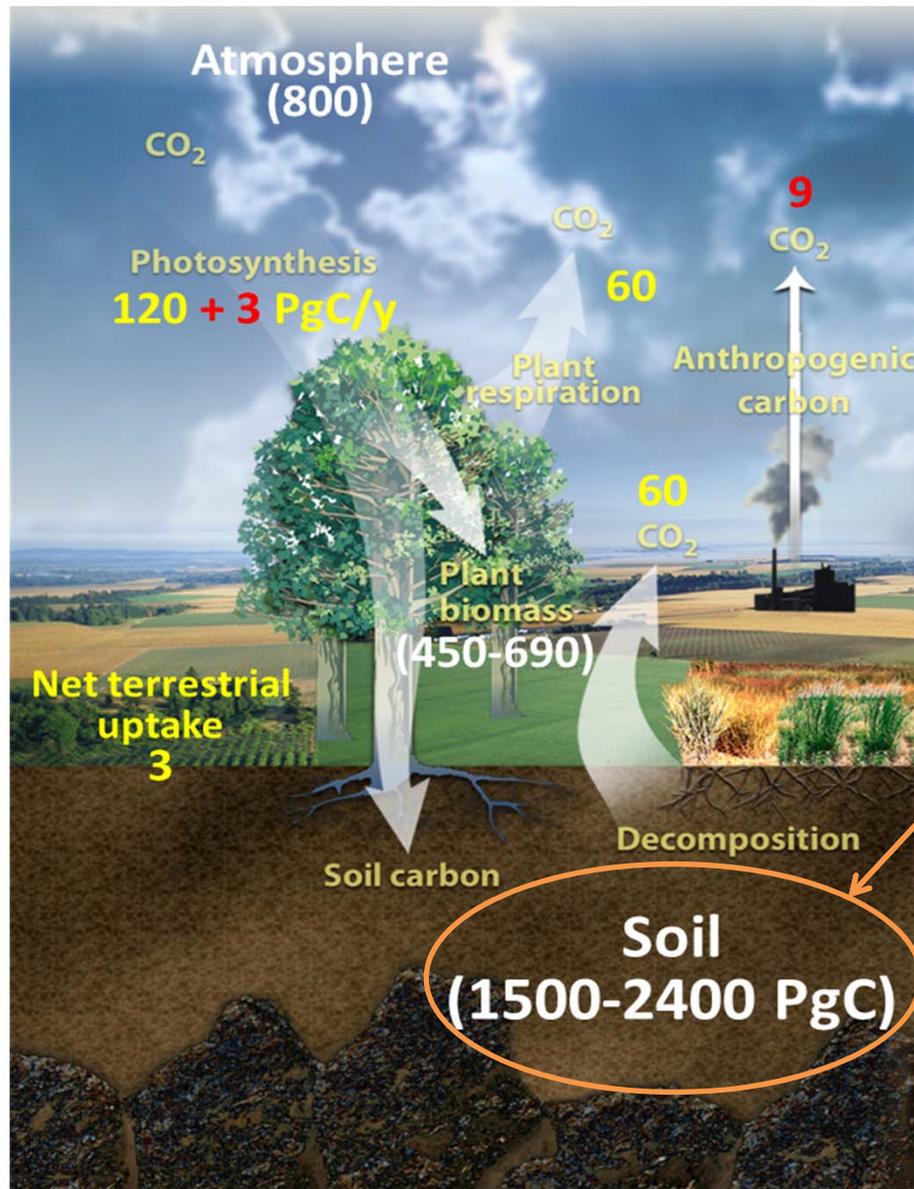
小嵐 淳

# 発表の構成

1. 炭素循環と土壌有機物
2. 放射性炭素( $^{14}\text{C}$ )の利用
3. 森林表層土壌における有機物の動態と多様性
4. まとめ

# 陸域における炭素循環

3/24



## 土壌

- ・ 炭素を有機物として貯留
- ・ 炭素貯留量は、大気の2～3倍、植物体が保持する炭素量の3～5倍に相当
- ・ その炭素貯留能をもって、大気中CO<sub>2</sub>濃度の安定化に貢献

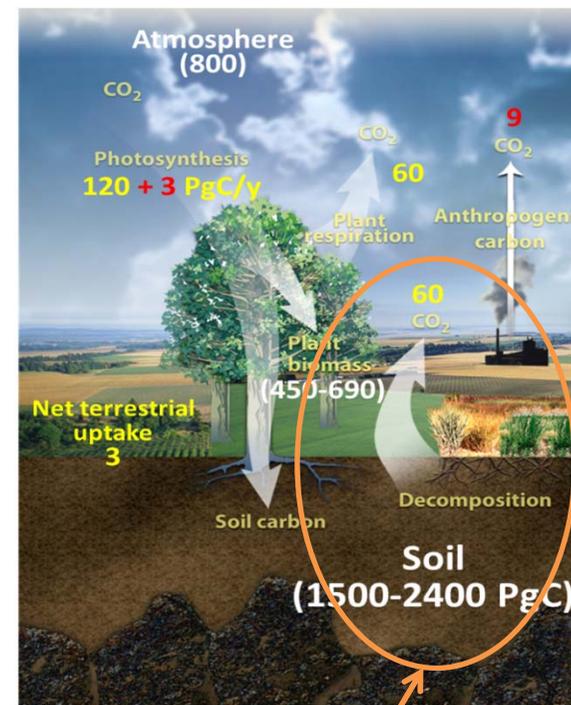
Diagram adapted from U.S. DOE, Office of Science.  
Data source: IPCC AR5, Working Group I Report (2013).

## 炭素循環と地球環境の相互作用



### 正のフィードバック効果

温暖化による温度上昇は、土壌有機物の分解を促し、土壌からの炭素放出量の増大によって、さらなる温暖化を引き起こす可能性が危惧



タイミングや規模、炭素循環全体への影響の程度は不明

## 地球環境変化の予測のカギ

土壌に大量に貯留する炭素が、環境変化に対してどう応答するか？

# 土壌有機物(炭素)の動態

5/24

土壌有機物は、多様な、そして複合的なプロセスによってその動態(分解性)が規定されている。

## 有機物自体の分解性

- ・ 分子構造の違い(糖類、セルロース、リグニン)
- ・ 微生物の代謝産物(より分解しにくい構造へ)

## 物理的な隔離

- ・ 土壌構造内部への有機物の閉じ込めによる、微生物や酵素からの隔離
- ・ 微生物の存在密度

## 鉱物との相互作用

- ・ 鉱物(粘土鉱物)への吸脱着
- ・ 有機物-金属複合体の形成

Schmidt et al. (2011) Nature.

土壌炭素の環境変化に対する応答を解明するためには、土壌有機物の多様な分解特性を定量的に把握することが重要

# 発表の構成

1. 炭素循環と土壌有機物
2. 放射性炭素( $^{14}\text{C}$ )の利用
3. 森林表層土壌における有機物の動態と多様性
4. まとめ

## 主な特徴

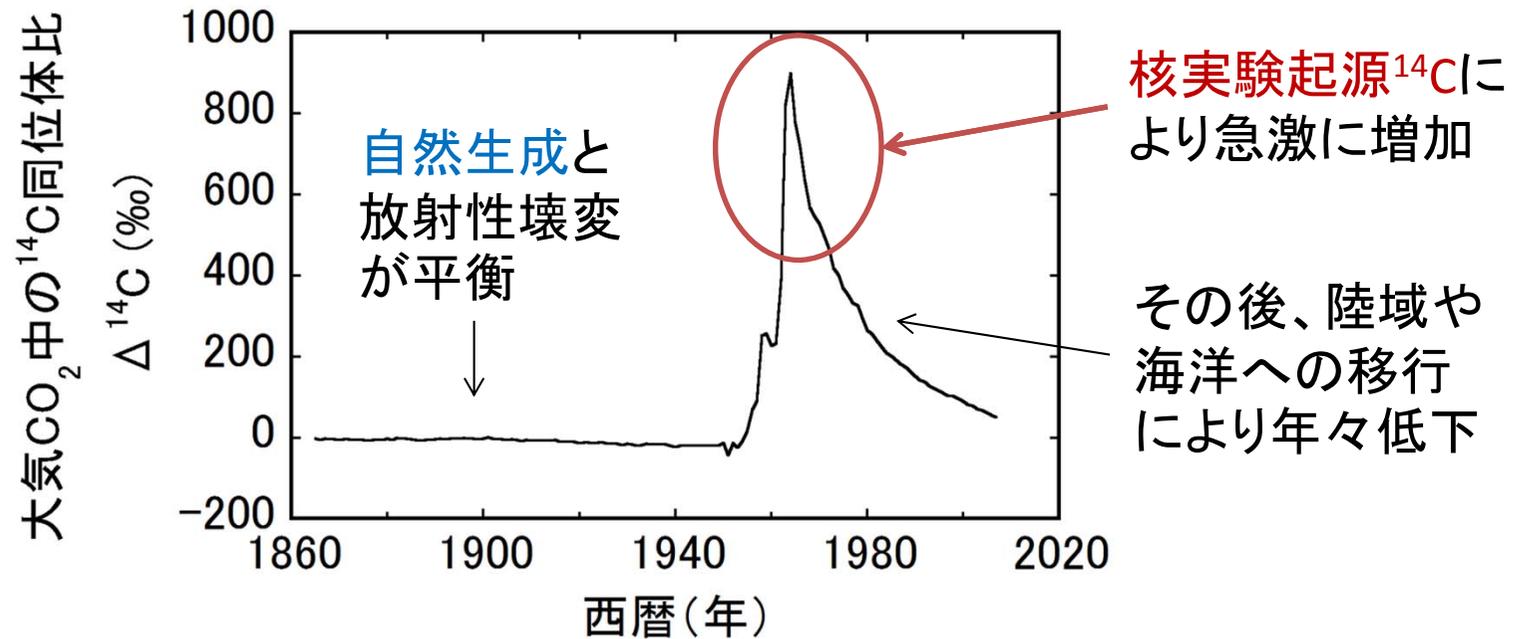
- 炭素の放射性同位体
- 半減期: 5730年
- 自然界の存在割合:  $^{12}\text{C}$  (98.9%)、 $^{13}\text{C}$  (1.1%)、 $^{14}\text{C}$  ( $10^{-100}\%$ )  
→  $^{12}\text{C}$ と同じように動く(光合成、土壌有機物、分解、 $\text{CO}_2$ ・・・)

## 主な起源

- **自然起源 $^{14}\text{C}$**   
宇宙線により大気圏上層で恒常的に生成
- **核実験起源 $^{14}\text{C}$**   
主に1951～1962年に集中して大気圏内で生成

# 大気中の $^{14}\text{C}$ 同位体比の変化

8/24



大気 $\text{CO}_2$ 中の $^{14}\text{C}$ 同位体比の変化

## $^{14}\text{C}$ 同位体比の表記法： $\Delta^{14}\text{C}$ 値

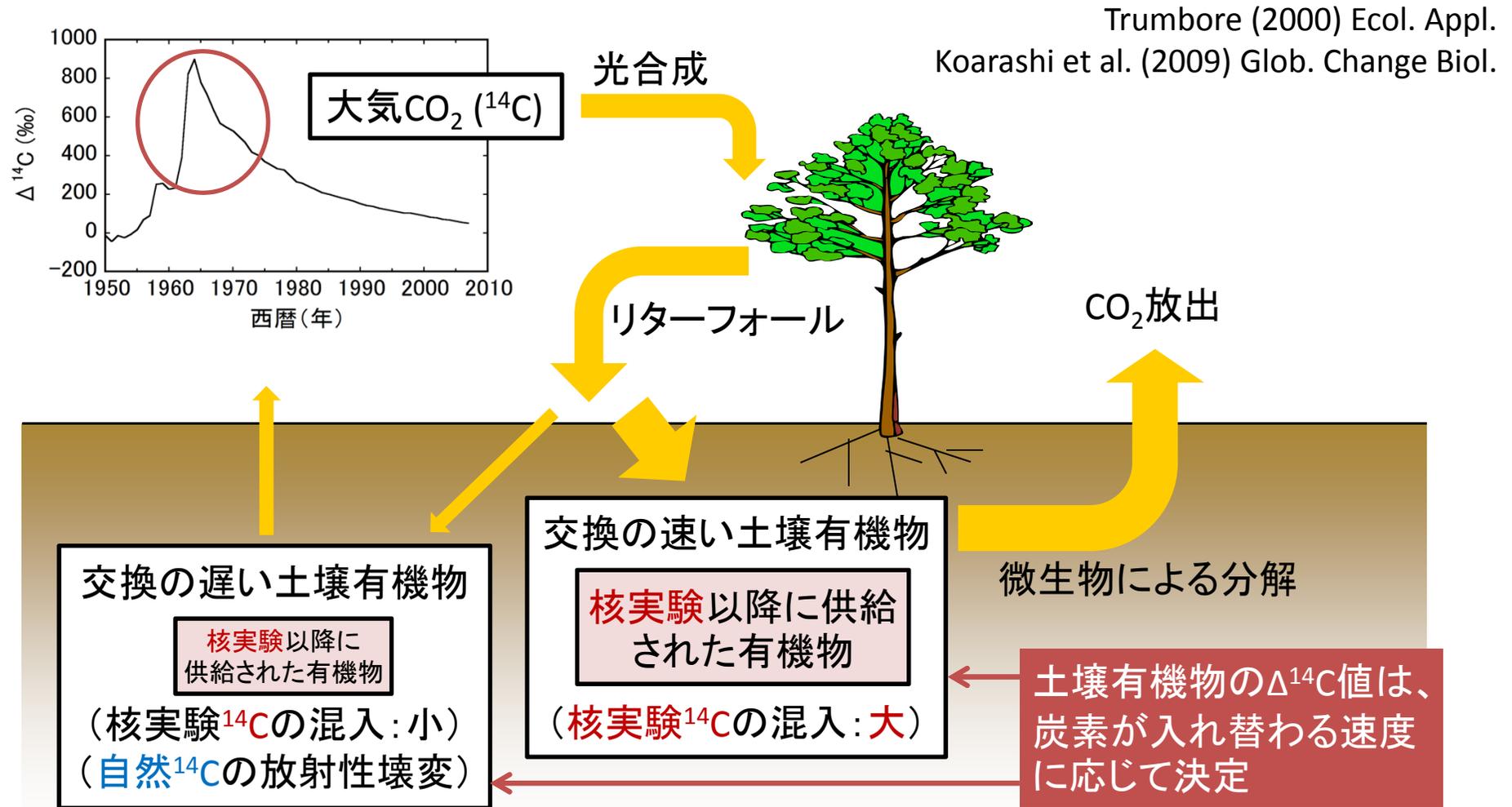
1950年の大気 $\text{CO}_2$ の $^{14}\text{C}$ 同位体比との差を千分率で表した値(単位:‰)

- $\Delta^{14}\text{C} < 0\text{‰}$ : 放射性壊変の結果を反映。値が低いほど古い炭素
- $\Delta^{14}\text{C} > 0\text{‰}$ : **核実験起源 $^{14}\text{C}$** の混入。1950年以降の大気 $\text{CO}_2$ を起源とする炭素を含む。

# 核実験起源 $^{14}\text{C}$ のトレーサー利用の原理

9/24

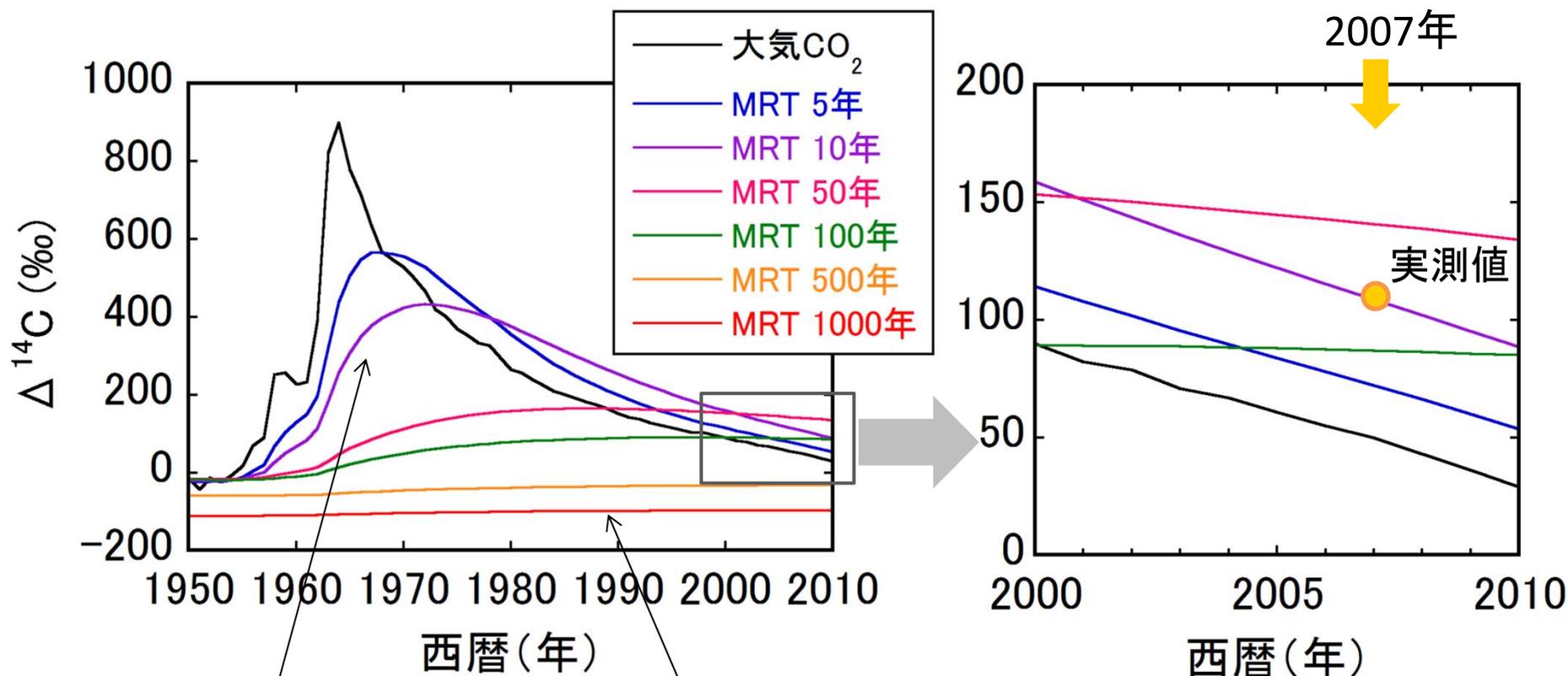
土壌有機物の $\Delta^{14}\text{C}$ 値は、「炭素がどのくらい長く土壌中に留まっているか」という時間情報を与える。



土壌有機物の $\Delta^{14}\text{C}$ 値を調べることで、分解特性を定量化できる

# 炭素の平均滞留時間の推定

炭素と $^{14}\text{C}$ の土壌への供給及び土壌有機物の分解をモデル化し、土壌有機物の $\Delta^{14}\text{C}$ 値と平均滞留時間(MRT:分解速度の逆数)の関係を導く。

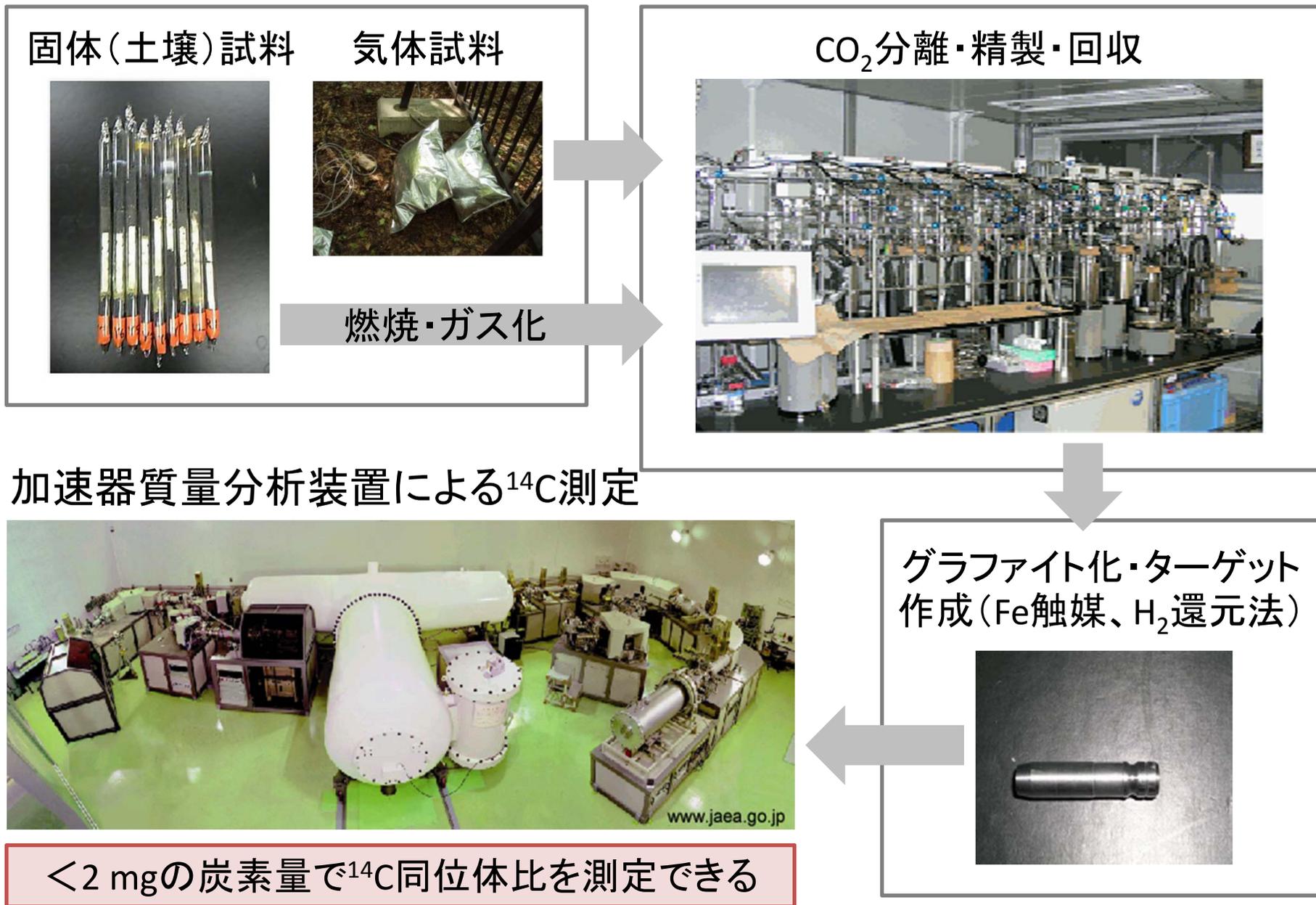


MRTが比較的短い場合、そのMRTに応じて、**核実験 $^{14}\text{C}$** の混入の程度や様子が変わる( $\Delta^{14}\text{C} > 0\text{‰}$ )。

MRTが長い場合、**核実験 $^{14}\text{C}$** の混入は少なく、放射性壊変の影響を受ける( $\Delta^{14}\text{C} < 0\text{‰}$ )。

モデルのMRTを可変させて、土壌採取年の実測値( $\Delta^{14}\text{C}$ )を取りうるMRTを探す。

# 加速器質量分析 (AMS) による<sup>14</sup>Cの測定 11/24



# 発表の構成

1. 炭素循環と土壌有機物
2. 放射性炭素 ( $^{14}\text{C}$ ) の利用
3. 森林表層土壌における有機物の動態と多様性
4. まとめ

## 研究のねらい

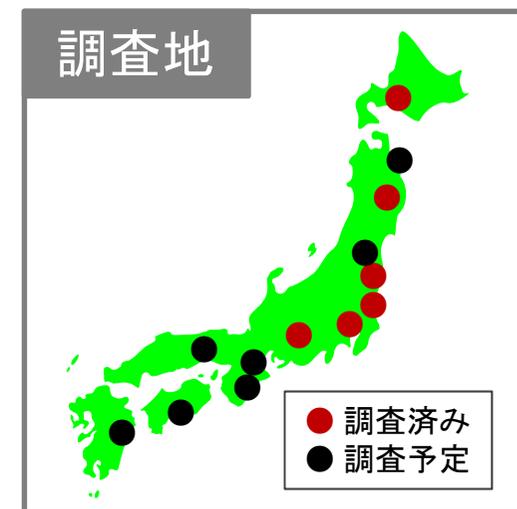
- ・日本の森林表層土壌に貯留する有機物は、**分解性の観点で、どのくらい多様であるか？**
- ・土壌有機物の**分解性を規定する要因は何か？**

## 研究のアプローチ

- (1) 国内の、気温、植生、土壌の鉱物学的特性が異なる森林で、土壌(深さ20 cmまで)を採取
- (2) 土壌有機物の<sup>14</sup>C同位体比を分析し、MRTを推定
- (3) MRTの分布に基づいて、土壌有機物がもつ多様な分解性を「**滞留時間別の炭素貯留量**」として定量的に表現する。

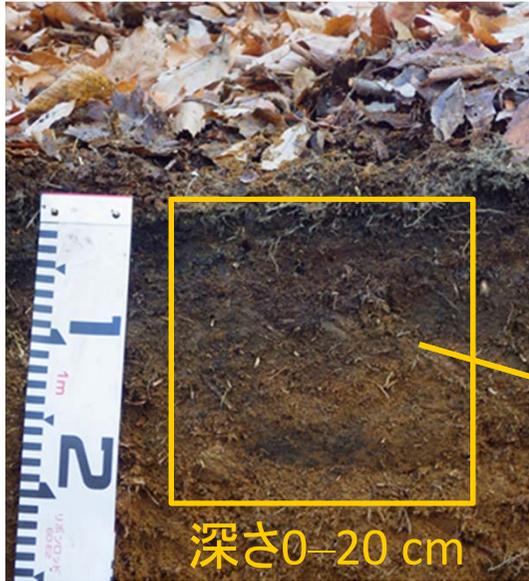
調査地	平均気温 (°C)	降水量 (mm)	土壌型	植生	Alp (kg m <sup>-2</sup> )	採取年
① 北海道	7.2	1167	アンドソル	ミズナラ、シラカバ	0.6	2008
② 愛知	8.6	1972	カンビソル	カラマツ	0.7	2009
③ 茨城1	13.5	1236	アンドソル	スギ	1.2	2010
④ 東京	14.1	1572	アンドソル	コナラ	1.3	2010
⑤ 岩手	6.1	1207	アンドソル	ブナ	1.5	2005
⑥ 茨城2	10.7	1910	アンドソル	ブナ、ミズナラ	2.1	2007

- ・ 年間平均気温、植生、土壌鉱物特性等が異なる場所
- ・ 年間平均気温は、6.1～14.1°C
- ・ 落葉性森林。ブナやミズナラなどの広葉樹から、スギやカラマツなどの針葉樹まで。
- ・ ピロリン酸ナトリウムによって抽出されるアルミニウムの量 (Alp: Al-有機物複合体) は、0.6～2.1 kg m<sup>-2</sup>



# 多様な分解性を表現するためのアイデア 15/24

## 森林表層土壌



0-20 cmの土壌の  
有機物をひとまとめ

土壌に対して1つの  
MRTしか得られず、1  
つの土壌がもつ多様な  
分解性を表現できない。

## アイデア 1

深さによって有機物の  
量や分解性が異なる

深さで分ける



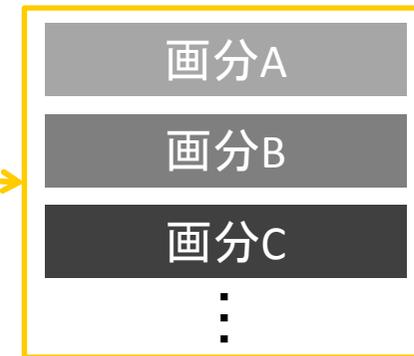
厚さ数cmごとの層に分  
ける

層の数だけ、各層を代  
表するMRTが得られる。

## アイデア 2

同じ深さ(層)でも、  
様々な形態・分解性  
の有機物が存在

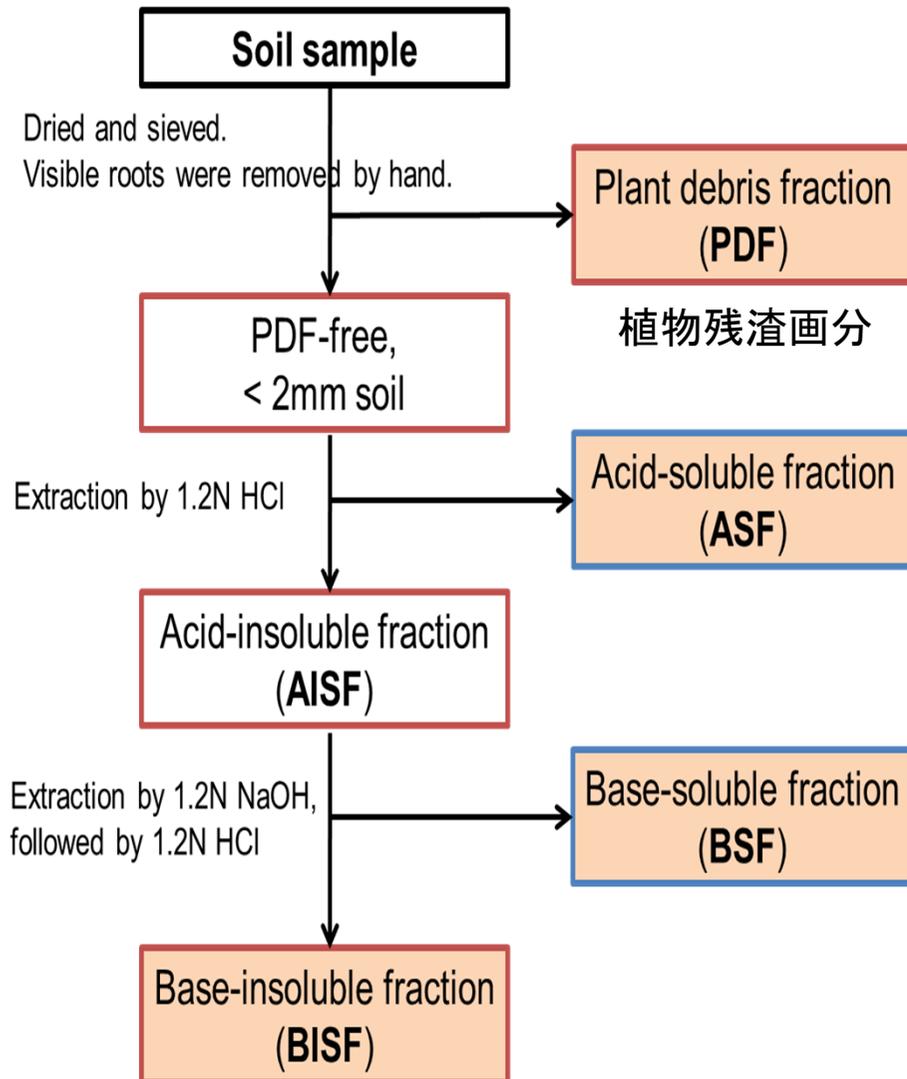
分画で分ける



層ごとに有機物を分画  
(化学的、物理的方法)

層の数 × 画分数の  
MRTが得られる。

## 化学抽出をベースとした分画法

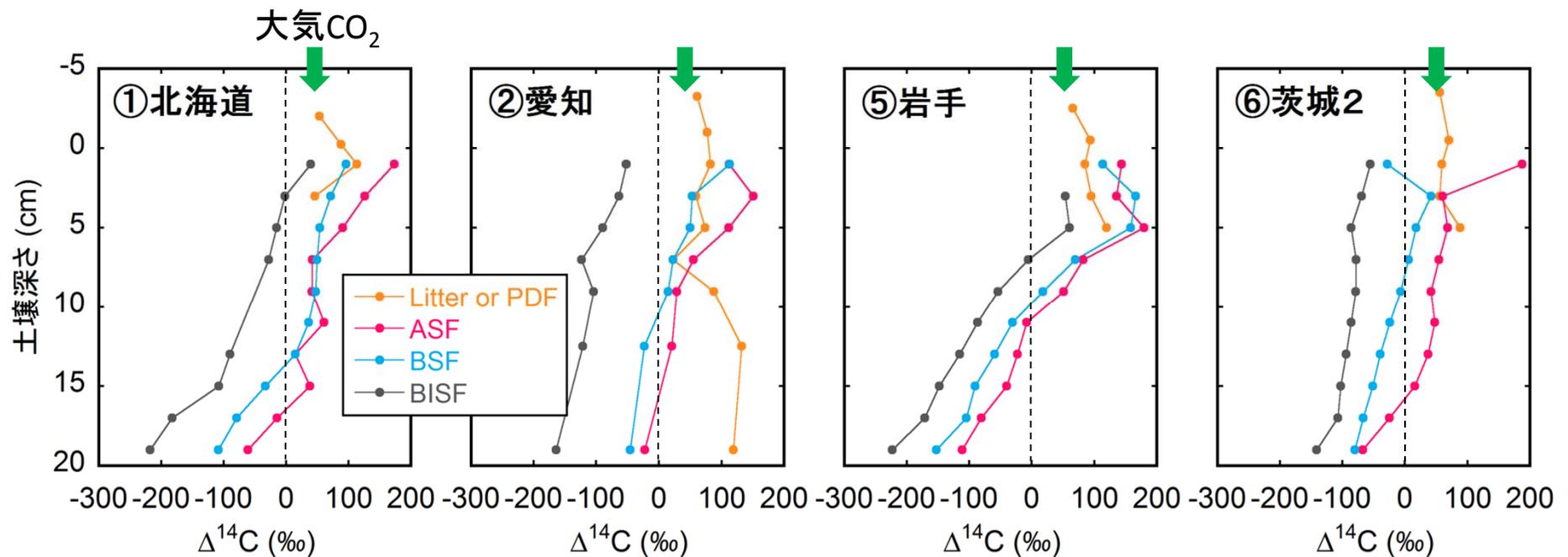


Legend for the diagram:

- 直接、炭素量と $\Delta^{14}\text{C}$ 値を測定
- 測定した画分の炭素量と $\Delta^{14}\text{C}$ 値に基づいて、マスバランス計算により、炭素量と $\Delta^{14}\text{C}$ 値を算出
- 最終的に知りたい画分

# 土壌有機物中の $^{14}\text{C}$ の分布

17/24



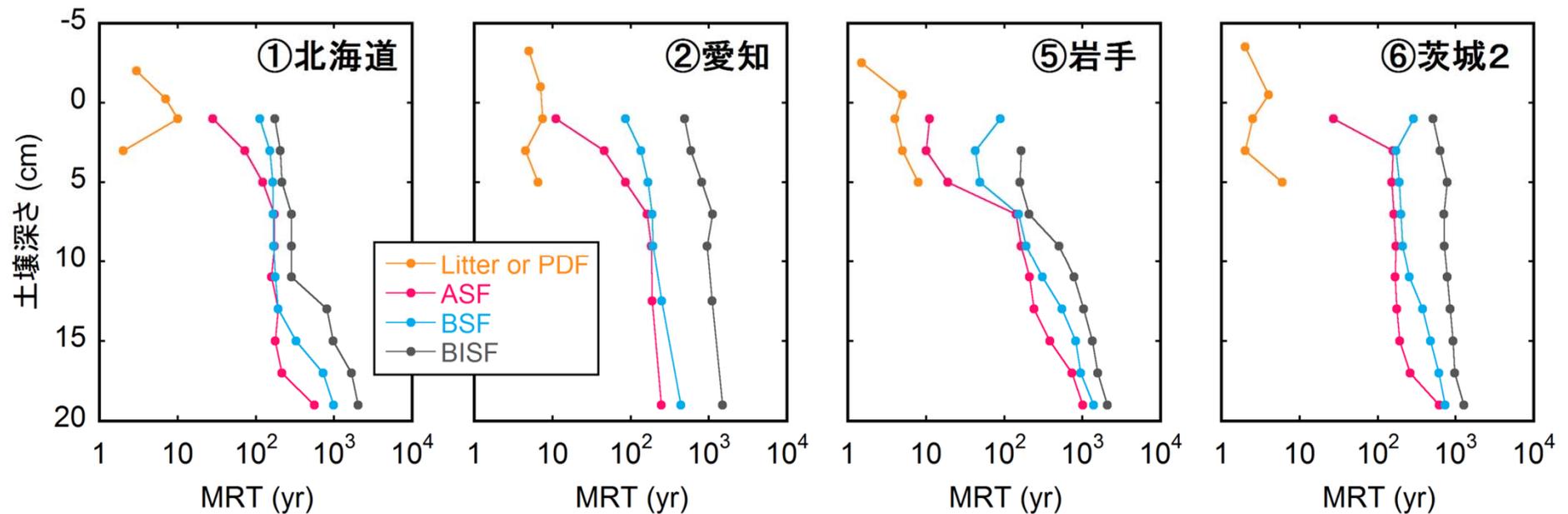
- ・ リター層と土壌中の植物残渣画分 (PDF) の $\Delta^{14}\text{C}$ 値は、大気 $\text{CO}_2$ よりも若干高い。
- ・ 土壌中の $\Delta^{14}\text{C}$ 値は、深さとともに、また化学抽出に対する安定性ととも減少。
- ・ 酸抽出画分 (ASF) とアルカリ抽出画分 (BSF) は、深さ10cm程度までにおいて $\Delta^{14}\text{C} > 0\text{‰}$ であり、**核実験起源 $^{14}\text{C}$** の混入が認められる。
- ・ 抽出されない画分 (BISF) は、全深さを通して、 $\Delta^{14}\text{C}$ 値が低い ( $< 0\text{‰}$ )。

土壌を深さごとに分画することで、 $\Delta^{14}\text{C}$ 値の異なる有機物に分けることに成功。

# 土壌有機物のMRTの分布

18/24

得られた $\Delta^{14}\text{C}$ 値に基づいて、各深さ、各画分のMRTを推定した。

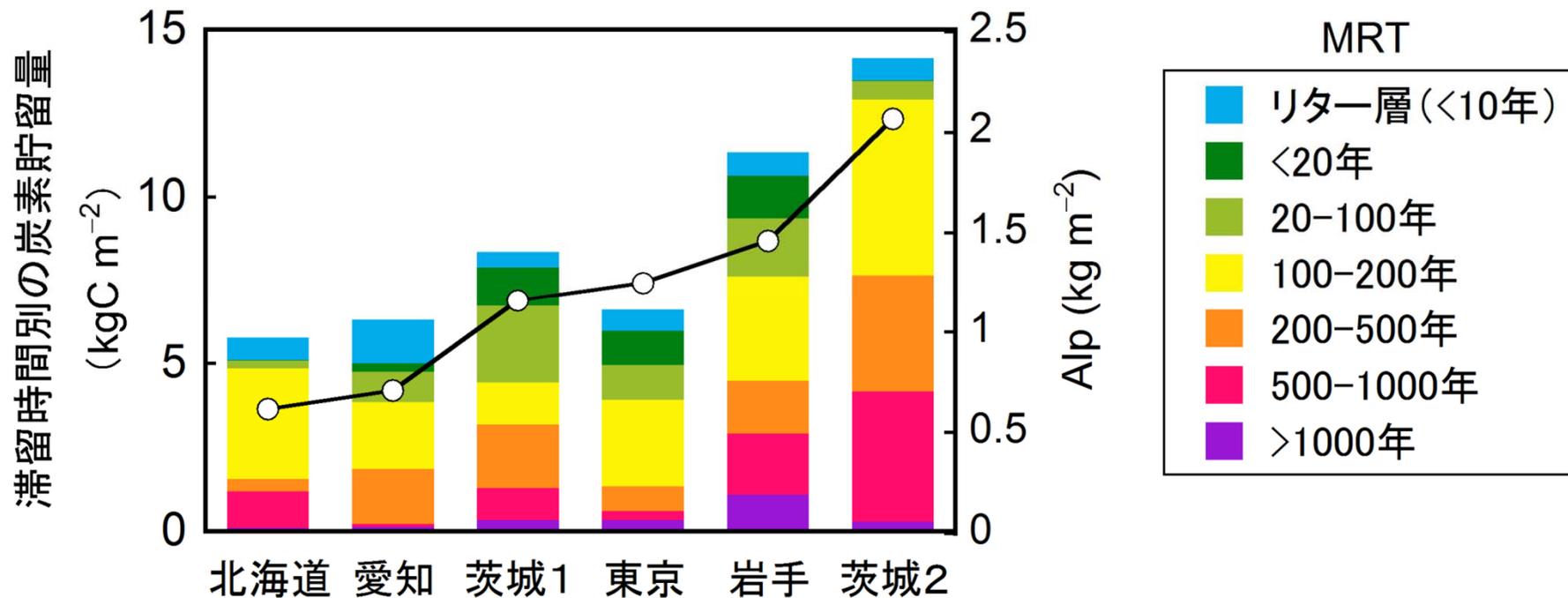


- ・ MRTは、深さとともに、また化学抽出に対する安定性ととも増加。
- ・ MRTは、数年(リター層やPDF)から、最大で2300年(採取した最下層のBISF)までの広い範囲で推定された。

土壌を深さごとに分画することで、MRTの異なる有機物(各土壌につき25–35種類)に分けることに成功。

# $^{14}\text{C}$ 分析が示す土壤有機物の多様な分解性<sup>19/24</sup>

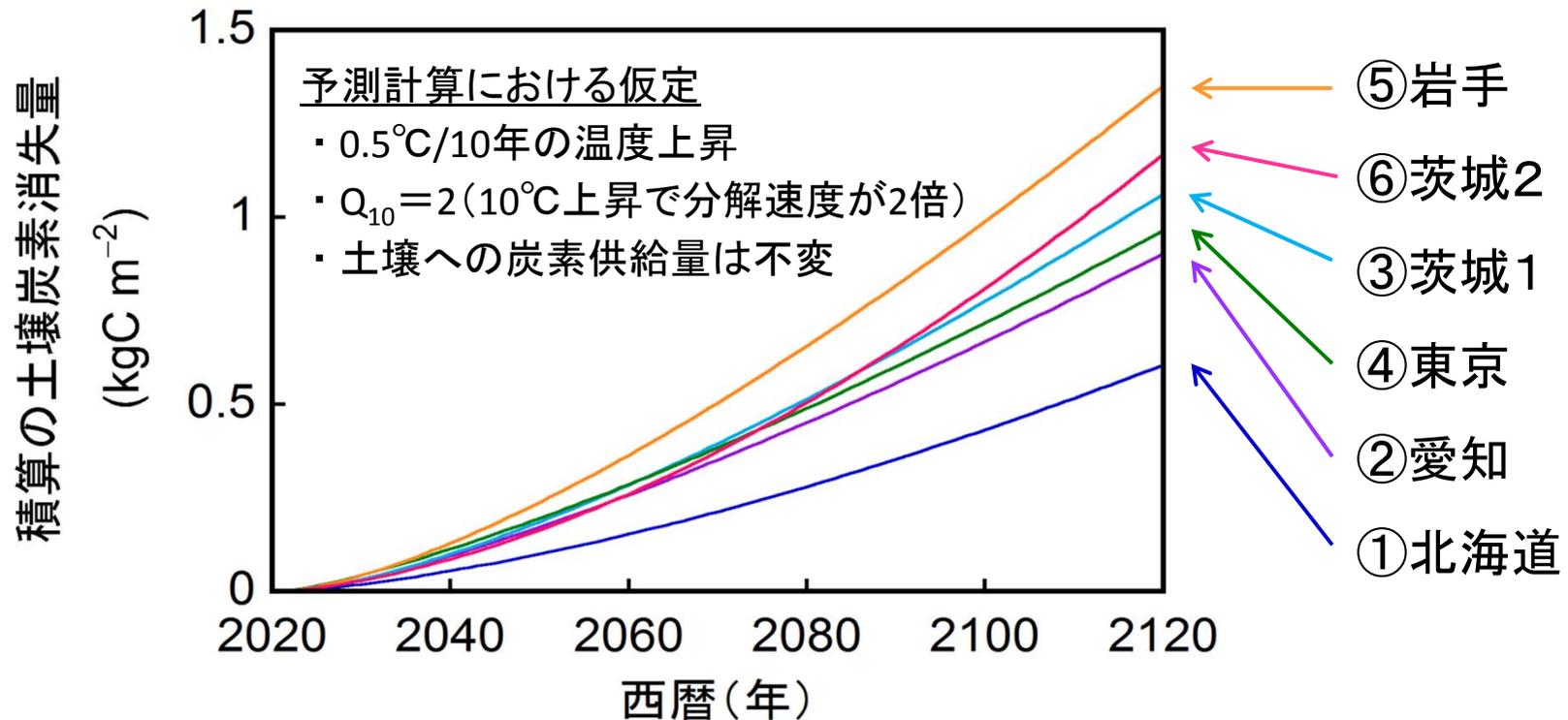
土壤有機物の多様な分解性を、「滞留時間別の炭素貯留量」として定量化する。



- ・ 土壤の炭素貯留「量」:  $5.8\text{--}14.1 \text{ kgC m}^{-2}$  (従来までの研究でわかること)
- ・ 土壤有機物の「分解性」も土壤によって異なる。MRT>100年の炭素の、全土壤炭素に占める割合は、53–91%
- ・ ピロリン酸抽出Al量 (Alp) が多い土壤ほど、MRTの長い有機炭素が多い傾向。

Al-有機物複合体の形成が>100年の長い時間スケールの土壤炭素動態を規定

# 温暖化に対する土壌炭素の応答の予測 20/24

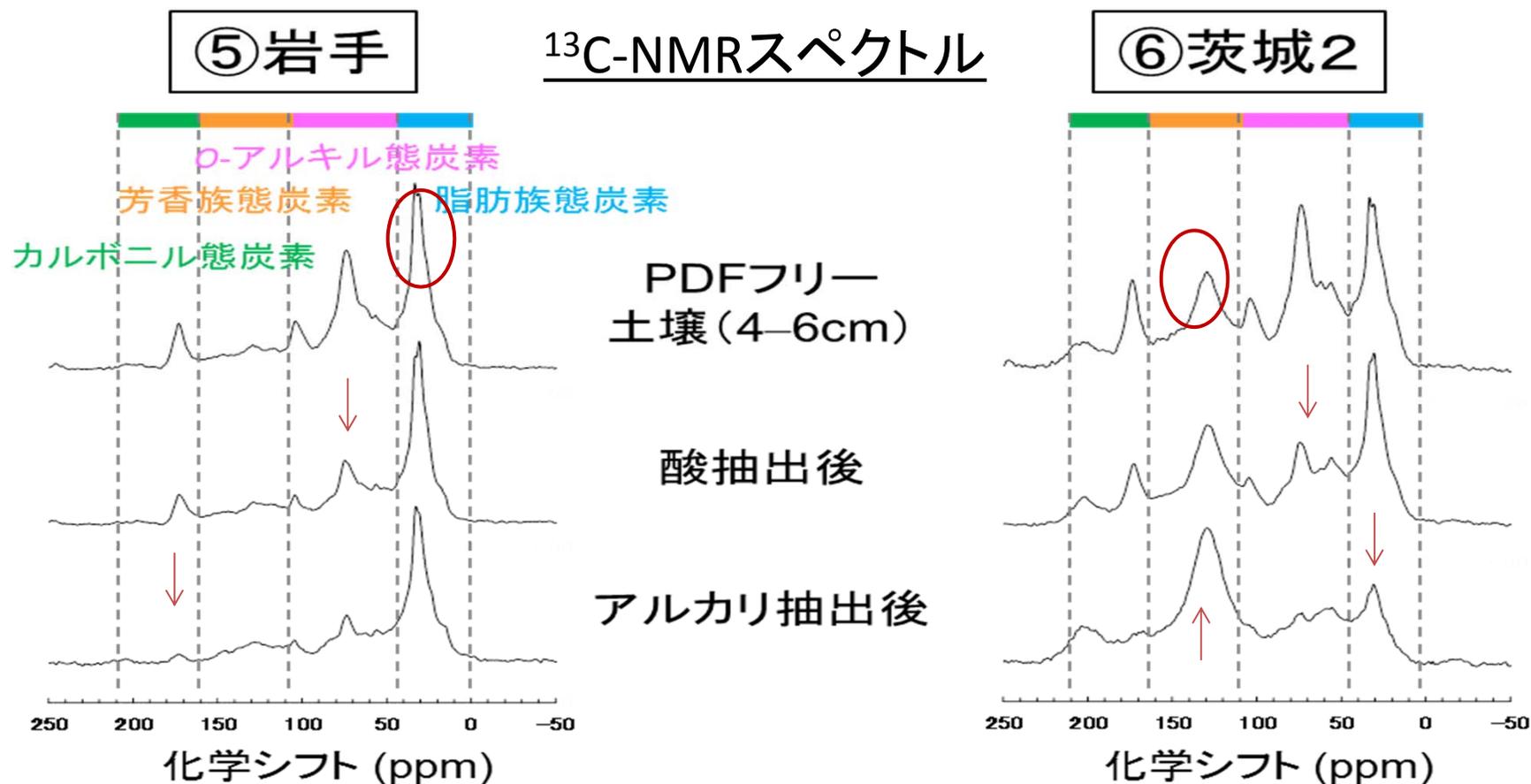


- ・ 温暖化の進行によって2120年までに消失する土壌炭素の量は、 $0.6\text{--}1.4\text{ kgC m}^{-2}$  (土壌炭素貯留量の8.3–14.6%に相当)
- ・ 土壌炭素の温暖化に対する応答の「規模」や「様子」は、土壌によって異なる。
- ・ 長期的には、貯留量が多くMRTの長い有機炭素の分解放出が相対的に重要に。

土壌有機物の分解性の定量的な理解が、温暖化応答予測において重要

# 土壌有機物の分子構造

21/24



- ・ 土壌有機物の炭素組成は土壌によって異なる。
- ・ 抽出される、もしくは抽出されない有機物も、土壌によって異なる。
- ・ 分子構造とMRT ( $\Delta^{14}\text{C}$ 値) の間に一貫性のある関連性は見出せない。

有機物の分解性を規定する種々の要因の相対的重要性は土壌によって異なる。

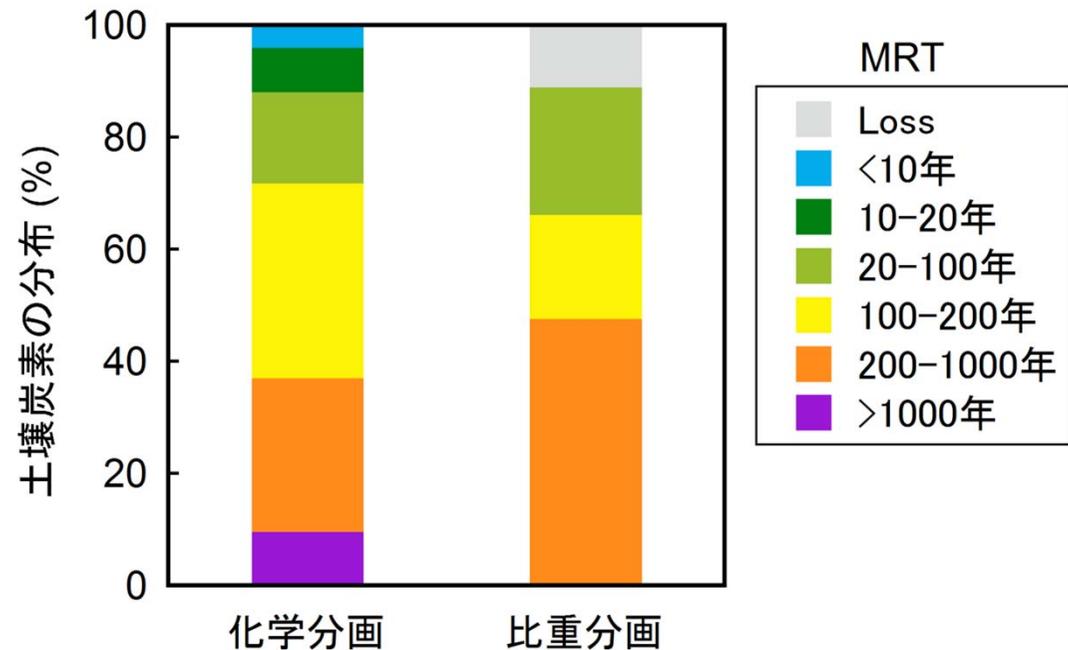
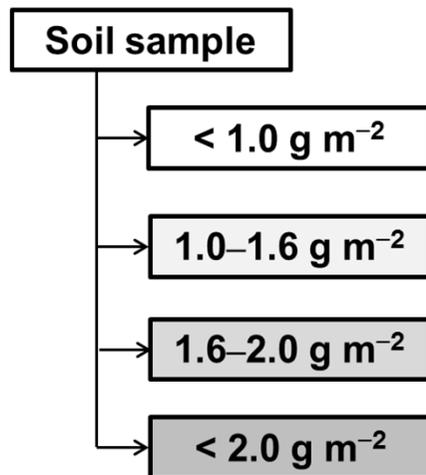
# 分画法の比較から見える課題

22/24

分画と $^{14}\text{C}$ 分析を組み合わせた方法は、土壌有機物の動態解明に有効であるが...

## 比重分画法

有機物と鉱物の相互作用に着目した方法



- ・ 分画法によって、異なる「滞留時間別の炭素貯留量」が得られた。
- ・ 化学分画でより幅広いMRT分布。比重分画で得られた有機物画分は、MRTの観点でより不均質性が高い。
- ・ いずれの有機物画分も、新しい炭素と古い炭素が混在

(土壌プロセスと関連付けつつ)より均質な画分を得る分画手法の確立が必要

- 放射性炭素分析によって、土壤有機物の分解性が極めて多様であることを示した。
- 土壤はその炭素貯留「量」のみでは推し量ることのできないCO<sub>2</sub>放出ポテンシャルを有している。
- 土壤有機物の多様な分解性と、それを規定するメカニズムを定量的に解明することが、将来の地球環境を予測する上で重要である。
- 放射性炭素の利用は、この目的の達成において有用な手段となりうるが、課題も残っている。
- 土壤炭素動態の定量化（見える化）と、土壤有機物の分解・安定化プロセスの解明に向けた取り組みを継続していく。

# 謝 辞

[ 日本原子力研究開発機構 ]

安藤 麻里子氏、國分 陽子氏、牧元しのぶ氏、石原 真樹子氏、松村 和美氏、  
青森研究開発センターAMS管理課の皆さま

[ 森林総合研究所 ]

石塚 成宏氏

[ 農業環境技術研究所 ]

平舘 俊太郎氏

本研究は、科研費23380096, 20710016の助成を受けたものです。